

## **COLABORACIÓN ITALO-ARGENTINA PARA EL ESTUDIO DE CELDAS SOLARES BASADAS EN MATERIALES III-V\***

**J. Plá<sup>1</sup>, M. Barrera<sup>1</sup>, M. Bosi<sup>2</sup>, C. Pelosi<sup>2</sup>, G. Attolini<sup>2</sup>, F. Rubinelli<sup>3</sup>, S. Fortin<sup>4</sup>, M.G. Martínez Bogado<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Grupo Energía Solar, CAC-CNEA, Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Provincia de Buenos Aires  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Tel. (011) 6772-7128; e-mail jpla@tandar.cnea.gov.ar

<sup>2</sup>IMEM-CNR, Parco Area delle Scienze 37/A, 43010 Fontanini, Parma, Italia

<sup>3</sup>INTEC-CONICET, Universidad Nacional del Litoral, Güemes 3450, 3000 Santa Fe

<sup>4</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

**RESUMEN:** Dentro de las distintas alternativas para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos se destacan sobre el resto dos tipos de materiales semiconductores cristalinos. Uno de ellos es el Si, de reconocido uso en aplicaciones terrestres de la conversión fotovoltaica (FV), mientras que en los últimos años los materiales III-V como base para la fabricación de celdas solares multijuntura han ganado un lugar más que destacado en aplicaciones espaciales. Considerando el consecuente interés que despiertan este tipo de dispositivos, se estableció una colaboración científica entre el GES de la CNEA y el Instituto IMEM-CNR de Parma, Italia, a fin de realizar estudios dirigidos a una mejor comprensión del funcionamiento y de las técnicas de fabricación y caracterización asociadas a las celdas solares basadas en materiales semiconductores III-V. Se presentan entonces las actividades realizadas hasta el momento en la deposición de películas semiconductoras por MOVPE, la optimización y simulación numérica de dispositivos, y finalmente la caracterización electrónica de los mismos.

**Palabras clave:** celdas solares, semiconductores III-V, simulación numérica, caracterización

### **INTRODUCCION**

Desde su introducción a mediados de 1950, las celdas solares han experimentado un desarrollo notable. Los dispositivos fotovoltaicos basados en Si fueron empleados inicialmente como fuente de energía eléctrica confiable y conveniente en satélites artificiales, mientras que en las últimas dos décadas encontraron su lugar de aplicación en la Tierra, donde pueden proveer electricidad en regiones aisladas o ser conectados a la red para aportar a la producción de electricidad.

Al inicio de los '80 la investigación sobre el arseniuro de galio (GaAs) tuvo un rápido desarrollo, debido al mejoramiento de las técnicas de crecimiento epitaxial como MOVPE (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy) y MBE (Molecular Beam Epitaxy), y este material comenzó a ser utilizado en aplicaciones fotovoltaicas; gracias a sus superiores propiedades físicas y mejor eficiencia de conversión respecto del Si, las celdas solares de GaAs fueron pronto adoptadas para aplicaciones espaciales.

Varios años más tarde, heteroestructuras más complejas basadas en arseniuros y fosfuros dieron lugar a celdas multijuntura. Las mismas fueron fabricadas sobre sustratos de Ge, con mejores propiedades mecánicas que el GaAs, obteniéndose así importantes mejoras en la década de 1990. Esto permitió sobrepasar la barrera del 20% de eficiencia (AM0), y obtener una significativa participación de celdas solares de este tipo en la provisión de potencia eléctrica para satélites. Hacia fines del año 2000 el objetivo del 30% de eficiencia de conversión fue alcanzado gracias al dispositivo de triple juntura InGaP/GaAs/Ge.

En la actualidad, los dispositivos FV basados en semiconductores III-V reemplazaron casi completamente a aquellos basados en Si como componente principal para módulos FV en aplicaciones espaciales debido a su considerablemente mayor eficiencia, bajo peso y mayor resistencia a la radiación. En cuanto a aplicaciones terrestres, el Si conserva su lugar como principal componente para módulos FV, dado que otros posibles materiales aún son demasiado costosos o conducen a eficiencias demasiado bajas.

Dada la importancia que han adquirido los dispositivos FV basados en materiales III-V, se inició una colaboración científica entre el Grupo Energía Solar (GES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y el Instituto IMEM (Istituto dei Materiali per l'Elettronica ed il Magnetismo) del CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) italiano a fin de profundizar el conocimiento sobre dichos dispositivos aprovechando las experiencias complementarias de ambos grupos.

---

\* Trabajo realizado en el marco del proyecto "Fabricación y caracterización de celdas solares para aplicaciones espaciales basadas en semiconductores III-V", MAE-SECyT (2006-2007) IT-PA05-E/X/037. Cuenta con financiamiento de CONAE, CNEA, CONICET y la ANPCyT a través del subsidio BID 1201/OC-AR, PICT No. 10-14327.

Se presentan en este trabajo las actividades desarrolladas en el marco de esta colaboración y relacionadas con: i) el crecimiento y caracterización de estructuras de materiales III-V por la técnica MOVPE para aplicaciones fotovoltaicas, ii) simulación numérica de dispositivos basados en materiales III-V, y iii) caracterización electrónica de dispositivos multijuntura.

### CRECIMIENTO DE ESTRUCTURAS III-V SOBRE SUSTRATOS DE Ge

Se realizaron crecimientos epitaxiales de películas de GaAs y InGaP mediante la técnica MOVPE en el laboratorio del IMEM-CNR de Parma, Italia. El proceso MOVPE utiliza gases hidruros (arsina y fosfina) y compuestos metalorgánicos apropiados para transportar dentro de la cámara de reacción, diluidos en el gas de arrastre ( $H_2$ ), las especies atómicas necesarias para el crecimiento. Los metalorgánicos son compuestos en los cuales un metal (por ejemplo Ga, In, Al...) está ligado a uno o más radicales orgánicos (grupos metílicos, etílicos, etc.) para formar una molécula que en general se encuentra en estado líquido en un rango de temperatura desde  $-20$  a  $+20^\circ C$ , posee una elevada presión de vapor y se descompone fácilmente a las temperaturas típicas de crecimiento ( $>500^\circ C$ ). Gracias a la gran variedad de compuestos metalorgánicos disponibles es posible la deposición de una amplia gama de materiales y el acceso a numerosas especies dopantes, no solo limitadas a aquellas metálicas; además, la tecnología MOVPE resulta apropiada para su empleo a nivel industrial.

El reactor epitaxial en uso en el IMEM ha sido proyectado enteramente por investigadores del Instituto y modificado para el agregado de numerosas líneas de precursores químicos a lo largo de los años. Actualmente es capaz de depositar compuestos binarios y ternarios sobre la base de Al-In-Ga-As, Al-In-Ga-P, y Ga-N-As, y dopar las películas mediante Zn (tipo n) y Si (tipo p). Está prevista, además, la instalación de un metalorgánico a base de Ge para la realización de capas epitaxiales de Ge sobre sustratos de Ge. Las deposiciones se efectúan normalmente sobre sustratos de 2" de diámetro (GaAs y Ge) a una temperatura de  $600^\circ C$  y a baja presión (60 mbar).

El empleo de sustratos de Ge en lugar de aquellos de GaAs se debe principalmente a sus superiores propiedades mecánicas, lo cual permite utilizar una menor cantidad de material y por lo tanto se obtienen dispositivos de menor peso, característica de suma importancia en aplicaciones espaciales. El Ge posee un reducido desajuste (*mismatch*) del parámetro de red respecto del GaAs (0,4%) y, además, es posible utilizarlo como región activa en una celda multijuntura.

Existen numerosos artículos en la literatura acerca de celdas solares GaAs/Ge y GaInP/GaAs/Ge (doble o triple juntura, según sea el Ge activo o no). Se realizó un relevamiento de la información existente, cuyo resultado se resume a continuación.

Una celda "estándar" de GaAs/Ge, según las primeras publicaciones, se realiza según el esquema que se presenta en la Fig. 1.

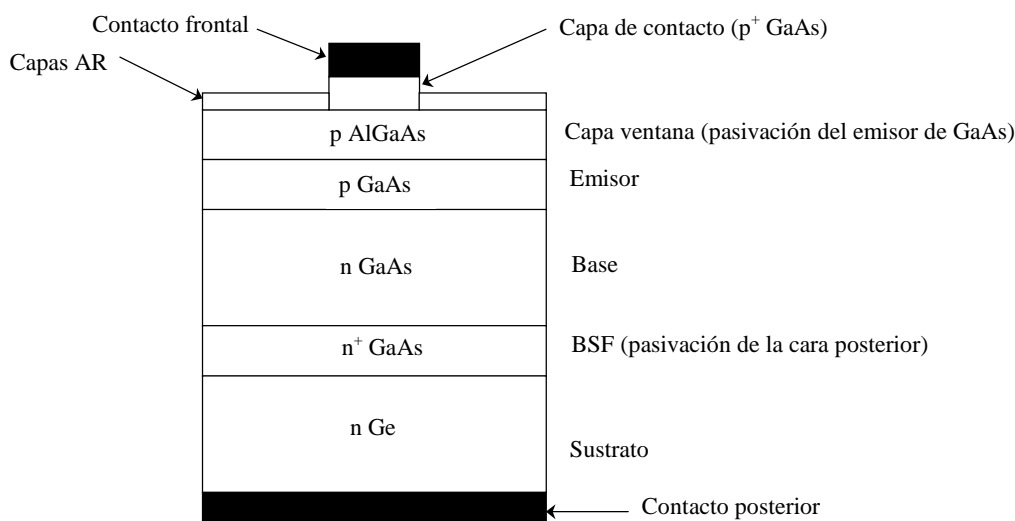


Figura 1: Estructura de una celda de GaAs sobre sustrato de Ge

Históricamente, las primeras celdas de GaAs/Ge se depositaron sobre sustratos tipo n, dopados con Sb (Chang et al., 1987, Cavicchi et al., 1988), o bien con As (Cavicchi et al., 1988), de modo de tener celdas con el emisor tipo p; esta tendencia luego fue cambiada dado que se supone que las capas tipo p tienen una movilidad de portadores minoritarios más alta así como una mejor resistencia al daño por radiación, siendo entonces más apropiadas para funcionar como base del dispositivo.

El Ge está generalmente corrido en orientación respecto de la dirección cristalina (100) en  $4^\circ$  (Chang et al., 1987), o bien en  $2^\circ$  (Tobin et al., 1988a, Tobin et al., 1988b, Kato et al., 1985), mientras que la concentración de dopante es del orden de  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (Cavicchi et al., 1988), con una resistividad de  $0,014 \Omega \text{ cm}$  (Tobin et al., 1988b).

Algunos autores depositan una capa *buffer* diferenciándolo de la base de la celda de GaAs, aunque en algunos casos se comporta como BSF (*Back Surface Field*) de la misma celda. Por ejemplo en (Cavicchi et al., 1988) se reporta una capa  $n^+$  de

GaAs de 1,7  $\mu\text{m}$ , en (Tobin et al., 1988a, Tobin et al., 1988b) de 2  $\mu\text{m}$ , y en Gillanders et al., 1991 de 5  $\mu\text{m}$ . En las multijunturas la capa BSF es mucho más delgada y se diferencia del buffer, el cual se deposita directamente sobre el Ge.

Para mejorar las propiedades electrónicas de la superficie del dispositivo se deposita sobre el emisor una capa de AlGaAs (llamada capa ventana) cuya función es pasivar el GaAs a fin de reducir la tasa de recombinación superficial. La composición de la aleación  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  proviene de un compromiso entre una menor absorción (que implica un  $x$  más grande) y una mayor resistencia a la oxidación (que se obtiene con  $x$  más pequeños) (Gillanders et al., 1991).

Para facilitar el contacto óhmico en la cara frontal resulta conveniente depositar una capa adicional tipo p de GaAs. Esta capa, luego de la deposición del contacto, se remueve mediante un ataque químico selectivo, de modo que solo permanece bajo la grilla de contactos frontal.

Un problema que aparece en varias publicaciones es el del autodopado del GaAs por medio de átomos de Ge que difunden desde el sustrato. Este fenómeno depende fuertemente de la temperatura de crecimiento y se basa en el hecho de que el Ge es un dopante tipo n del GaAs y difunde en el mismo a una profundidad que depende de la temperatura de crecimiento. En las muestras elaboradas en el IMEM la temperatura es mantenida en 600°C para evitar este fenómeno.

De acuerdo a la información recavada en la literatura, se propusieron y generaron las primeras muestras de estructuras monolíticas apropiadas para la elaboración de homojunturas de GaAs, tanto sobre sustrato de Ge como de GaAs; las características de la estructura realizada, siguiendo la idea básica de la celda presentada en la Fig. 1, son:

Capa de contacto p GaAs [Zn], 0,5  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ; capa ventana p AlGaAs [Zn], 0,03  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; emisor p GaAs [Zn], 0,1  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; base n GaAs [Si], 3,5  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; BSF n<sup>+</sup> GaAs [Si], 0,5  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; sustrato n Ge [Sb]. Los corchetes indican cual es el dopante utilizado en cada caso.

Por otra parte, como una alternativa en aplicaciones terrestres de celdas III-V, una celda homojuntura de InGaP es una óptima candidata para ser puesta en tandem con una celda de Si, dado que puede convertir con mucha mayor eficiencia los fotones de energía superior a 1,8 – 1,9 eV. Así, la luz incidente puede ser separada por un adecuado reflector dicróico incidiendo sobre cada celda de Si e InGaP solo la parte del espectro a convertir por cada una de ellas. En lo que concierne a aplicaciones espaciales, el estudio de la celda homojuntura de InGaP es el primer paso para su integración en un dispositivo multijuntura del tipo InGaP/GaAs y InGaP/GaAs/Ge. La estructura de dicha celda es conceptualmente la misma que aquella de GaAs, aunque en este caso se prefiere generalmente una capa ventana de AlInP, dado que la recombinación, de los portadores en la interfaz AlGaAs-p e InGaP-p es muy elevada ( $10^6 \text{ cm/s}$ ) respecto a la que se obtiene entre AlInP-p e InGaP-p ( $< 2 \times 10^5 \text{ cm/s}$ ) (Wojtczuk et al., 1993). Dado que aún no ha sido optimizada la deposición de capas de AlInP, el material usualmente utilizado para pasivar el InGaP, se optó por la deposición de AlGaAs, como en el caso de la celda de GaAs. La estructura realizada se resume en:

Capa de contacto p GaAs [Zn], 0,2  $\mu\text{m}$ ,  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ; Capa ventana p AlGaAs [Zn], 0,025  $\mu\text{m}$ ,  $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; Emisor p InGaP [Zn], 0,1  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; Base n InGaP [Si], 1  $\mu\text{m}$ ,  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; BSF n<sup>+</sup> InGaP [Si], 0,02  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; Buffer n<sup>+</sup> GaAs [Si], 0,4  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; Sustrato n Ge [Sb].

La propuesta de estructura para una celda homojuntura de InGaP se basa esencialmente en los trabajos de Takamoto et al., 1994, Takamoto et al., 1997, y Takamoto et al., 1999, donde pueden encontrarse detalles acerca de materiales, espesores, y concentraciones de dopaje utilizadas en este tipo de celdas.

## OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE DISPOSITIVOS

Se iniciaron actividades conducentes a la optimización y simulación numérica de dispositivos basados en materiales semiconductores III-V.

En el caso de la simulación numérica, se trabajó en la adaptación del programa D-AMPS-1D (un ejemplo de sus aplicaciones puede verse en Rubinelli et al., 2001), diseñado inicialmente solo para celdas solares basadas en silicio amorfo y microcristalino, introduciendo la posibilidad de recombinación directa, usual en materiales III-V, sus correspondientes propiedades electro-ópticas (índice de refracción, coeficiente de absorción, movilidad de portadores, *gap*, etc.), doble capa antirreflectante (AR), y espectro solar AM0. También se tuvo en cuenta, a fin de extender en el futuro la simulación a una celda triple juntura InGaP-GaAs-Ge, que los parámetros ópticos y el espectro solar estuvieran definidos para todo el intervalo de respuesta de dicha celda (300 nm -1900 nm).

Como parte del trabajo de simulación numérica, se consideró un caso particular de un dispositivo homojuntura de GaAs cuya estructura y valores experimentales de los parámetros eléctricos fueron publicados en Bett et al., 1999. La estructura presentada en dicho artículo es similar a aquella de la Fig. 1, salvo que la capa pasivante del emisor es de InGaP y el sustrato, de todas maneras no activo, es de GaAs. Dado que no se explicitaban valores de los espesores de la doble capa AR  $\text{MgF}_2\text{-TiO}_2$  utilizada se hicieron cálculos de optimización numérica a fin de determinarlos, pero considerando además la influencia de la capa de InGaP pasivante del emisor; parte de los resultados de esta optimización pueden verse en la Fig. 2, mientras que los detalles acerca del procedimiento utilizado pueden encontrarse en Plá et al., 2003. En la Fig. 2 se muestra que la capa ventana de InGaP influye sensiblemente en los valores óptimos de los espesores de  $\text{MgF}_2$  y  $\text{TiO}_2$ .

Finalmente, la simulación del dispositivo completo se realizó utilizando el D-AMPS-1D, considerando los valores óptimos del AR calculados anteriormente y ajustando la densidad de defectos en el volumen para variar la vida media de los portadores minoritarios, obteniéndose un acuerdo razonablemente bueno entre los valores de los parámetros eléctricos simulados y experimentales tanto para la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) como para la corriente de cortocircuito ( $J_{sc}$ ), como

puede verse en la Tabla I. La diferencia observada en el factor de forma FF, y en consecuencia en la eficiencia de conversión  $\eta$ , se debe al hecho de que en la simulación numérica no se consideraron las pérdidas óhmicas debidas a los contactos eléctricos que se verifican en un dispositivo real.

	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
Parámetros experimentales (Bett et al., 1999)	1035	26,7	84,3	23,3
Parámetros simulados por el D-AMPS-1D	1039	26,4	88,1	24,1

Tabla I. Parámetros eléctricos experimentales y simulados para una celda de GaAs

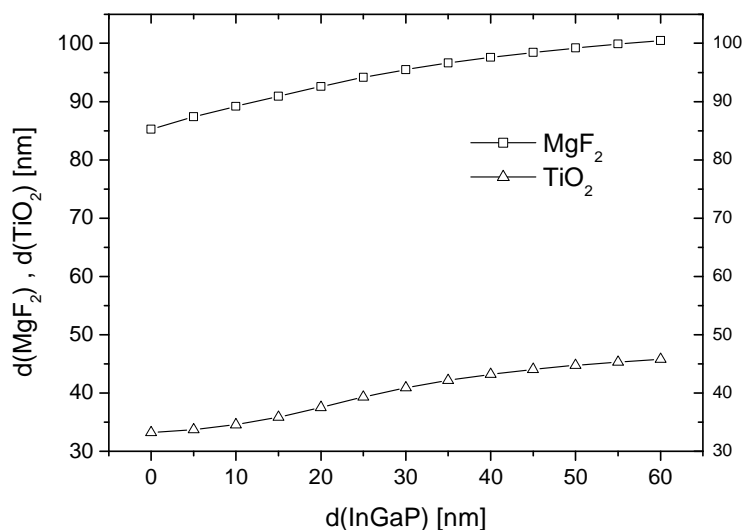


Figura 2: Espesores óptimos de MgF<sub>2</sub> y TiO<sub>2</sub> calculados para diferentes espesores de la capa pasivante de InGaP usando el espectro solar AM0.

Espesor de InGaP (nm)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) ( $S_f=200$ cm/s)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) ( $S_f=1 \times 10^7$ cm/s)
30	26,38	25,94
15	26,57	26,48
5	26,39	26,39
0	25,96	13,23

Tabla II. Corriente de cortocircuito de celdas solares de GaAs con la superficie frontal pasivada y no pasivada para distintos espesores de la ventana de InGaP

Se realizaron también simulaciones del dispositivo completo para distintos espesores de la capa pasivante de InGaP, en los casos en que la cara frontal está pasivada y no pasivada (velocidad de recombinación superficial  $S_f$  200 cm/s y  $10^7$  cm/s respectivamente) Nuestros resultados se resumen en la Tabla II. Puede observarse el beneficio de la pasivación del emisor de GaAs por parte del InGaP, así como un espesor óptimo (aquel que hace máxima la  $J_{sc}$ ) de este último del orden de los 15 nm.

### MEDICIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL EN DISPOSITIVOS MULTIJUNTURA

El diseño del equipo de medición de respuesta espectral (RE) en celdas multijuntura, la definición del procedimiento de medición, y las primeras mediciones realizadas fueron presentadas en un artículo anterior (Fortin et al., 2005). El equipo desarrollado se basa esencialmente en una serie de filtros ópticos de banda angosta que definen la perturbación monocromática, una luz de polarización a la que es posible modificar su espectro, y un amplificador *lock-in* para la medición de la señal generada por la celda. Se realizaron avances referidos a la automatización de la medición, habiéndose desarrollado un programa para la adquisición de datos que permite verificar la estabilización de la medición del *lock-in* considerando la evolución del promedio de 10 lecturas, tomadas una por segundo. Cuando las diferencias de los últimos 4 promedios se encuentra debajo de un cierto valor (por ejemplo del 1% del promedio total), se calcula el valor medido y su dispersión estadística como el promedio de las últimas 40 lecturas. Este procedimiento permite obtener mediciones de una mayor precisión e independientes del operador.

De esta forma fue posible refinar las mediciones de RE lo cual posibilitó, por una parte, generar un nuevo patrón de Si mejor definido en 400 nm e incorporando el punto correspondiente al filtro de 340 nm y, en consecuencia, obtener mediciones más precisas respecto a las presentadas en Fortin et al., 2005.

En la Fig. 3 se observa la eficiencia cuántica externa (ECE) de las subceldas de InGaP y GaAs correspondientes a una celda ATJ (*Advanced Triple Junction*) InGaP-GaAs-Ge fabricada por la empresa Emcore, calculada a partir de la medición de la respuesta espectral RE según la ecuación (Fortin et al., 2005):

$$ECE(\lambda) = \frac{hc}{q} \times \frac{RE(\lambda)}{\lambda} \quad (1)$$

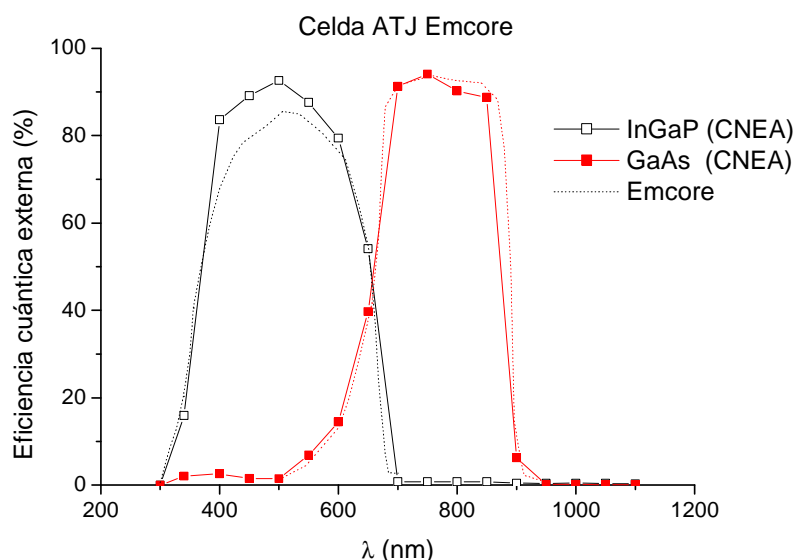


Figura 3: Eficiencia cuántica externa de las subceldas de InGaP y GaAs, calculada a partir de la respuesta espectral medida en CNEA para una celda ATJ Emcore InGaP-GaAs-Ge, y publicada en Stan et al., 2003 (línea punteada).

En la misma figura se muestran también los datos de ECE para una celda ATJ Emcore típica publicados en Stan et al., 2003. Como puede verse, las curvas resultan cualitativamente similares y, mientras que en el caso de la subcelda de GaAs el acuerdo entre ambas curvas es muy bueno, en el caso de la subcelda de InGaP la medición realizada en CNEA da por resultado una ECE un poco mayor. Por medio del cálculo la integral de las curvas de RE pesadas con el espectro solar AM0, se obtuvo la densidad de corriente de cortocircuito de cada subcelda de 18,08 mA/cm<sup>2</sup> para la subcelda de InGaP, y de 16,62 mA/cm<sup>2</sup> para aquella de GaAs. Así, la subcelda de GaAs aparece limitando la corriente de la multijuntura, contrariamente al criterio de optimización aplicado por Emcore a sus dispositivos de hacer limitar la corriente por la subcelda de InGaP. Dado que la celda ATJ medida corresponde a un lote de dispositivos descartados por Emcore por sus deficientes características eléctricas, este resultado podría representar una evidencia de este hecho.

## CONCLUSIONES

Se presentaron parte de las actividades realizadas hasta el presente a través de una colaboración entre el Instituto IMEM-CNR de Italia y el GES de la CNEA dirigida al estudio de celdas solares multijuntura. Entre dichas actividades, se encuentran la deposición de estructuras monolíticas de GaAs e InGaP sobre sustratos de Ge aptas para la fabricación de celdas solares, la simulación y optimización numérica de dispositivos de GaAs, y la caracterización de multijunturas a partir de la medición de la respuesta espectral de cada subcelda.

En todos los casos se obtuvieron resultados acordes con los objetivos planteados en dicha colaboración, los cuales servirán como base para profundizar el conocimiento de las mencionadas celdas solares basadas en semiconductores III-V.

## REFERENCIAS

- Bett, A.W., Dimroth, F., Stollwerck, G., Sulima, O.V. (1999). III-V compounds for solar cell applications. *Applied Physics A* 69, 119-129.
- Chang, K.I. Yeh, Y.C.M., Iles, P.A., Tracy, J.M., Morris, R.K. (1987). Heterostructure GaAs/Ge solar cells. *Proceedings of the 19<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 273-279.
- Cavicchi, B., Lillington, D.R., Garlick, G.F.J., Glenn, G.S., Tobin, S.J. (1988). GaAs on Ge cell and panel technology for advanced space flight application. *Proceedings of the 20<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 918-923.
- Tobin, S., Vernon, S.P., Bajgar, C., Haven, V.E., Geoffroy, Lillington, D.R. (1988). High-efficiency GaAs/Ge monolithic tandem solar cells. *IEEE Electron Device Letters* 9, 256-258.

- Tobin, S., Vernon, S.P., Bajgar, C., Haven, V.E., Geoffroy, L.M., Sanfacon, M.M., Lillington, D.R., Hart, R.E., Emery, K.A., Matson, R.J. (1988). High-efficiency GaAs/Ge monolithic tandem solar cells. Proceedings of the 20<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 405-410.
- Kato, M., Mitsui, X., Mizuguchi, K., Hayafuji, N., Ochi, S., Yukimoto, Murotani, T., Fujikawa, K. (1985). MOCVD AlGaAs/GaAs solar cells on GaAs, Ge, and Ge/Si substrate. Proceedings of the 18<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 14-19.
- Fortin, S., Martínez Bogado, M.G., Plá, J. (2005). Respuesta espectral de celdas solares multijuntura para aplicaciones espaciales: diseño del equipo y primeras mediciones. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 9, 04.01-04.06.
- Gillanders, M.S., Krut, D.D., Vijayakumar, P.S., Mason, A.V., Glenn, G.S., Lillington, D.R., Cavicchi, B.T., Yang, H.T., Ralph, R.K. (1991). Production and qualification status of GaAs/Ge top/bottom solar cells. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1469-1473.
- Plá, J., Tamasi, M., Rizzoli, R., Losurdo, M., Centurioni, E., Summonte, C., Rubinelli, F. (2003). Optimization of ITO layers for heterojunction a-Si/c-Si solar cell applications, Thin Solid Films **425**, 185-192.
- Rubinelli, F.A., Rath, J.K., Schropp, R.E.I. (2001). Microcrystalline *n-i-p* tunnel junction in *a*-Si:H/*a*-Si:H tandem cells. Journal of Applied Physics 89, 4010-4018.
- Stan, M.A., Aiken, D., Sharps, P.R., Hills, J., Clevenger, B., Fatemi, N.S. (2003). The development of >28% efficient triple-junction space solar cells at Emcore Photovoltaics. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 662-665.
- Takamoto, T., Ikeda, E., Kurita, H. (1997). Over 30% efficient InGaP/GaAs tandem solar cells. Applied Physics Letters 70, 381-383.
- Takamoto, T., Yamaguchi, M., Taylor, S.J., Yang, M., Ikeda, E., Kurita, H. (1999). Radiation resistance of high-efficiency InGaP/GaAs tandem solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells 58, 265-276.
- Takamoto, T., Ikeda, E., Kurita H., Ohmoril. M. (1994). High efficiency InGaP solar cells for InGaP/GaAs tandem cell application. Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1729-1733.
- Wojtczuk, S.J., Vernon, S.M., Sanfacon, M.M. (1993). Comparison of windows for P-on-N InGaP solar cells. Proceedings of the 23<sup>rd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 655-658.

**ABSTRACT:** Among the different alternatives for the fabrication of PV devices, two types of crystalline semiconductor materials outstand over the rest. One of them is the Si, of accredited use in terrestrial applications of PV conversion, while in the last years III-V materials as a base for the fabrication of multijunction solar cells have gained a distinguished place in space applications. Considering the consequent interest generated by this type of devices, a scientific collaboration between the Solar Energy Group (GES) from CNEA and the IMEM-CNR Institute from Parma, Italy, was established in order to perform studies aimed to gain a better knowledge about its functioning, and the fabrication and characterization techniques associated to the solar cells based on III-V semiconductor materials. Thus, activities performed to date on the deposition of semiconductor films by MOVPE, optimization and numerical simulation of devices, and finally electronic characterization of such devices are presented.

**Keywords:** solar cells, III-V semiconductors, numerical simulation, characterization